

文章编号: 1007-2993(2026)05-0755-10

基于纤维桥接与钙离子调控的水泥-水玻璃 固结体韧性增强机制研究

冯 啸¹ 侯本敖¹ 孙 文¹ 杨文达¹ 石振中¹ 张石磊² 李美玲²

(1. 山东建筑大学 交通工程学院, 山东济南 250101; 2. 内蒙古引绰济辽供水有限责任公司, 内蒙古兴安盟 137499)

【摘要】 在实际工程中, 水泥-水玻璃(C-S)固结体因韧性不足, 难以有效吸收动态载荷能量。为解决这一问题, 提出 CaO-EG-PP 三元协同改性体系, 通过调控钙离子浓度与聚丙烯纤维桥接作用, 系统研究不同配比(0%~5% 氧化钙(CaO)、0.04% 乙二醇(EG)、0%~1% 聚丙烯纤维(PP))对 C-S 固结体力学性能的影响, 结合凝结时间、抗压强度、折压比、拉压比及抗冲击试验, 揭示其韧性增强机制。结果表明, 体积比($V_c : V_s$)由 2 : 1 增至 5 : 1 时, 凝结时间缩短 41.2%~54.2%; CaO(1%)+EG(0.04%)组在 PP 掺量 0.2% 时抗压强度达 6.75 MPa(较对照组提升 13.4%), 且弹性模量同步提高 36.1%; CaO(3%)+EG(0.04%)组拉压比较对照组提升 5.4%~104.1%, PP 桥接作用使完全开裂冲击耗能提升至 147.15 J(对照组 39.24 J)。研究表明, 钙离子浓度优化平衡硅氧四面体电荷密度以稳定凝胶结构, EG 氢键强化界面结合, 纤维桥接与拓扑缠绕抑制微裂缝扩展, 三者协同实现“离子调控-氢键稳定-纤维增韧”耦合增强。

【关键词】 双液浆; 纤维桥接; 拉压比; 抗冲击性能; 韧性; 力学性能

【中图分类号】 TU441

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0202

Toughness enhancement mechanism of cement-sodium silicate composites based on fiber bridging and calcium ion regulation

FENG Xiao¹ HOU Benao¹ SUN Wen¹ YANG Wenda¹ SHI Zhenzhong¹
ZHANG Shilei² LI Meiling²

(1. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China;

2. Inner Mongolia Yin Chao Ji Liao Water Supply Co., Ltd., Hinggan League 137499, Nei Mongol, China)

【Abstract】 Cement-sodium silicate (C-S) grout struggles to effectively absorb dynamic load energy in practical engineering due to insufficient toughness. To address this problem, a ternary synergistic modification system of CaO-EG-PP was proposed. By regulating calcium ion concentration and the bridging effect of polypropylene (PP) fibers, the effects of different mixing ratios (0%~5% calcium oxide (CaO), 0.04% ethylene glycol (EG), 0%~1% PP fibers) on the mechanical properties of C-S consolidates are investigated. Combined with experiments on setting time, compressive strength, flexural-compressive strength ratio, tensile-compressive strength ratio and impact resistance, the toughness enhancement mechanism is revealed. The results show that when the volume ratio ($V_c : V_s$) increases from 2 : 1 to 5 : 1, the setting time is shortened by 41.2%~54.2%. For the group with 1% CaO + 0.04% EG, the compressive strength reaches 6.75 MPa at a PP fiber content of 0.2%, which is 13.4% higher than that of the control group, and the elastic modulus increases by 36.1% simultaneously. The tensile-compressive strength ratio of the group with 3% CaO + 0.04% EG is increased by 5.4%~104.1% compared with the control group, and the PP fiber bridging effect raises the impact energy consumption at complete cracking to 147.15 J (39.24 J for the control group). The study indicates that optimized calcium ion concentration balances the charge density of silicate tetrahedra to stabilize the gel structure, ethylene glycol strengthens interfacial bonding via hydrogen bonds, and fiber bridging together with topological entanglement inhibits microcrack propagation. The three components synergistically realize the coupled enhancement of ion regulation-hydrogen bond stabilization-fiber toughening.

【Key words】 cement-sodium silicate slurry couple; fiber bridging; tensile-to-compressive ratio; impact resistance test; toughness; mechanical properties

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(52009075); 山东省自然科学基金(ZR2020QE262); 山东省自然科学面上基金(ZR2024ME119)

作者简介: 冯 啸, 男, 1988 年生, 博士, 副教授, 主要从事地下工程灾害防控的研究。E-mail: fengxiao19@sdjzu.edu.cn

0 引言

随着中国基建行业的快速发展,注浆材料的研究与应用愈发受到学界与工程界的重视。作为隧道工程、矿山工程、地质灾害防治、水利工程及建筑加固等领域的关键材料,注浆材料在充填、固结和胶结固化方面发挥着不可替代的作用。普通硅酸盐水泥因其高强度、超流态和良好的填充性被广泛应用,但其凝结时间难以控制、固结体脆性大、易开裂等问题,常影响工程加固效果。

与普通硅酸盐水泥注浆材料相比,速凝类注浆材料具有速凝早强、抗动水冲刷、留存率高等特点,而水泥-水玻璃(C-S)浆液是目前最常用的速凝类注浆材料^[1-4],添加水玻璃能大幅度提高水泥浆体的流动性和强度^[5-6]。陈鹏等^[7]探究了水泥-水玻璃双液浆中各项基础材料对物理力学性能的影响规律,得出水泥-水玻璃双液浆能够在4 h左右终凝稳固管片环,使管片环的竖向变形量控制在-10~10 mm,地面沉降量也能在280 h左右稳定控制在-4.3~3.3 mm。郑昊等^[8]提出了超细水泥净浆水灰质量比为1:1,水玻璃溶液为20°Bé,缓凝剂磷酸氢二钠掺量为2.5%,水泥浆液约占总注浆量的80%,水玻璃与缓凝剂各占约10%配合比下该水泥固结体凝结时间和强度最优。汤青青等^[9]在激发剂的作用机理研究中得出所研制的激发剂最佳质量比为1:150(三乙醇胺:氢氧化钙)。李祖仲等^[10]通过系统研究硫铝酸盐水泥(SAC)、铁铝酸盐水泥(FAC)与普通硅酸盐水泥(OPC)的复配比例,确定了SAC与OPC的最优质量配合比为3:2,FAC与OPC的最优质量配合比为4:1。张轶等^[11]得出了改性水滑石(LDHs-NO₂)经层间离子交换实现对Cl⁻的吸附,并同步释放NO₂⁻。王晨宇等^[12]基于纤维增强基体理论,得出了当纤维均匀分布且取向平行于基体受力方向时,其在微观层面能有效抑制因水泥基复合材料内部拉应力低而产生的微裂缝;在宏观层面,纤维可显著提高水泥基复合材料的抗拉、抗弯强度及延性。Liu等^[13]得出了随着卸荷应力比的增大,不同初始围压下的变形模量均呈现近似线性减小趋势,而对内摩擦角的影响相对较小。卸荷过程中,黏聚力随卸荷应力比增大呈线性减小,而内摩擦角则呈现相反的变化规律。曾熙文等^[14]得出了当PP掺量为0.1%时,复合注浆材料S1的综合性能最佳,硬化结石体3 d和28 d抗压强度分别为60.1 MPa和83.7 MPa,比未添加PP的参照组S0分别提高23.4%和23.2%。马豪达等^[15]通过分析砂浆受压过程中的应力-应变曲线,得出了随着水胶比

从0.3增大至0.5,强度降低35%,橡胶掺量从0%增加至75%,强度降低84%。贾毅等^[16]得出了在单轴拉伸状态下,PP纤维体积掺量为1.50%和2.00%的PP-ECC试件,纤维与基体的桥联作用效果最好,都表现出明显且稳定的应变硬化能力,极限拉伸应变均超过了4%。沈霖等^[17]得出了随着PP纤维掺量的增加,水泥-矿渣复合材料的力学性能呈现上升后下降的趋势。当PP纤维掺量为0.6%时,试样的达到16.89 MPa,相较于空白组提高了14.2%。范淋等^[18]研究了超弹性形状记忆合金纤维(SMAF)掺量和直径对高延性工程水泥基复合材料的拉伸性能影响显著;当SMAF直径为0.2 mm、掺量为0.2%(体积分数)时,新型复合材料(SMAF-ECC)试件拉伸性能最优,相较于ECC试件,SMAF-ECC试件的初裂应力增幅最高为16.79%,极限拉伸应力、应变分别提高了20.85%和2.87%。

现有研究主要关注C-S浆液的凝结时间及其固结体刚度指标(如抗压强度),而对固结体的韧性及抗开裂性能的关注相对不足。本文在前人研究的基础上,提出CaO-EG-PP三元协同改性体系,通过钙离子浓度调控、氢键稳定和纤维桥接的协同作用,系统研究了C-S固结体的韧性及其抗开裂性能,并揭示了离子调控、氢键稳定和纤维增韧的耦合机理。为解决上述问题,本文基于水灰质量比1:1的普通硅酸盐水泥浆液,30°Bé、20°Bé的水玻璃浆液,水泥浆液与水玻璃浆液体积比为2:1,5:1(即 $V_c:V_s=2:1,5:1$)的条件,设计了氧化钙(CaO)、乙二醇(EG)、聚丙烯纤维(PP)的不同掺量配比,分析了水泥-水玻璃双浆液的凝结时间、7 d抗压强度、折压比、拉压比力学性能以及抗冲击性能的变化规律,以期特殊注浆加固工程提供一定的参考。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

试验用水泥为陶家建材厂生产的P·O 42.5普通硅酸盐水泥,水玻璃为嘉悦化工生产的40°Bé、3.2模数液体硅酸钠水玻璃(密度1.42 g/cm³,氧化钠含量8.3%,氧化硅含量26.2%),氧化钙为航钨高纯氧化钙粉(CaO含量≥99.9%,相对分子含量56.077,密度3.35 g/cm³),乙二醇(EG)为华夏试剂生产,性能见表1,纤维为江西南昌森海建材12 mm长度的聚丙烯纤维(PP,纤维直径31 μm,断裂延伸率30%,抗拉强度≥400 MPa,杨氏模量≥3.5 GPa,熔点约160 ℃)。

1.2 试验方法

(1)凝结时间:由于C-S浆液凝结时间过短,维

表 1 乙二醇技术指标
Tab. 1 Technical indicators of ethylene glycol

C ₂ H ₆ O ₂ 含量 /%	密度(20 ℃) /(g·cm ⁻³)	相对分子含量	水分/%	灼烧残渣/%	酸度(以H ⁺ 含量计) /(mmol·g ⁻¹)	硫酸盐含量/%
≥99.5	1.112 ~ 1.115	62.07	0.2	0.005	0.001	0.002

卡仪不适于凝结时间试验,本试验采用倒杯法测定浆液的初凝时间^[19-20]。

(2)抗压强度:采用 $\phi 50$ mm、高 100 mm 的圆筒状模具,通过压力试验机,按照《水泥混凝土圆柱体轴心抗压强度试验方法》(T 0555—2005)^[21] 进行。

(3)抗折强度:使用 40 mm × 40 mm × 160 mm 的长方体模具,通过抗压抗折试验机,按照《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—2021)水泥胶砂强度检验方法^[22] 进行。

(4)抗拉强度:采用狗骨型试件(见图 1),厚 13 mm ± 0.5 mm,通过电子万能机,按照《高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法》(JC/T 2461—2018)^[23] 进行。

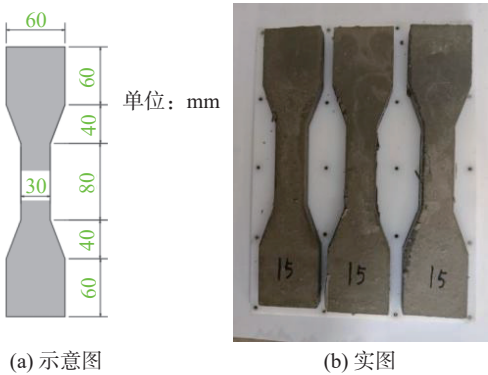


图 1 拉伸试件形状及尺寸
Fig. 1 Shape and dimensions of tensile test specimens

(5)抗冲击性能:采用《纤维混凝土试验方法》(CECS 13:2009)^[24] 标准,用落锤法进行 C-S 浆液固结体抗冲击性能测试,试件固定在塑料板上,冲击点位置为试件正中心,受力面积为不锈钢球与试件的接触面,抗冲击试验的试件尺寸为 $\phi 150$ mm、高 65 mm 的圆饼状试件,龄期为 7 d。落锤为实心不锈钢球,直径 90 mm,质量为 2.1 kg。

1.3 配合比及试样制备

在水泥浆液水灰质量比为 1 : 1(水泥 1000 g),水玻璃为 30°Bé 和 20°Bé,水泥浆液与水玻璃浆液体积比 $V_c : V_s = 2 : 1$ 和 $5 : 1$ 的条件下,通过对相关文献^[25-28] 进行研究,初步选择了 CaO、EG、PP 用量范围。试验材料配比见表 2,试验方案见表 3。

每组试验均做 3 个试件,误差不超过 10%,结果

取平均值。对照组为纯水泥-水玻璃浆液(表 3 中编号 1 试验组),掺量百分比是指相对于对照组水泥掺量的质量比,CaO 质量计入水泥质量。

表 2 材料配比
Tab. 2 Material ratio

水平	因素	
	CaO的掺量/%+EG的掺量/%	PP的掺量/%
1	0.00(0 g)+0.00(0.0 g)	0.0(0 g)
2	1.00(10 g)+0.04(0.4 g)	0.2(2 g)
3	3.00(30 g)+0.04(0.4 g)	0.6(6 g)
4	5.00(50 g)+0.04(0.4 g)	1.0(10 g)

表 3 试验方案
Tab. 3 Experimental plan

编号	CaO的掺量/%+ EG的掺量/%	PP的 掺量/%	编号	CaO的掺量/%+ EG的掺量/%	PP的 掺量/%
1	0+0.00	0.0	9	3+0.04	0.0
2	0+0.00	0.2	10	3+0.04	0.2
3	0+0.00	0.6	11	3+0.04	0.6
4	0+0.00	1.0	12	3+0.04	1.0
5	1+0.04	0.0	13	5+0.04	0.0
6	1+0.04	0.2	14	5+0.04	0.2
7	1+0.04	0.6	15	5+0.04	0.6
8	1+0.04	1.0	16	5+0.04	1.0

试件的制备,按设计比例将水泥与 CaO 粉末倒在仪器中与同质量的水混合,采用转速 1380 r/min 的搅拌机搅拌 2 min 后加入 EG 和 PP,继续搅拌 30 s 后将水玻璃倒入容器,搅拌 5 s 后装模。

2 结果与讨论

2.1 凝结时间

凝结时间直接决定施工进度,是注浆材料的重要性质之一。将水玻璃调制成 30°Bé、20°Bé 并按水泥浆液与水玻璃浆液体积比 $V_c : V_s = 2 : 1$ 和 $5 : 1$ 混合,用倒杯法测得凝结时间^[19],即手持 A、B 两杯,倾斜 45°反复倾倒,直至浆液不再流动时所经历的时间为初凝时间(见图 2(a))。

分析图 2(b)可知,随着波美度的降低,C-S 浆液的凝结时间减少。在 $V_c : V_s = 2 : 1$ 、水玻璃 20°Bé 条

件下,浆液凝结时间为 17~21 s,比 30°Bé条件下凝结时间为 21~24 s 减少了 12.5%~19%;在 $V_c:V_s=5:1$ 、水玻璃 20°Bé条件下,浆液凝结时间为 10~11 s,比 30°Bé条件下凝结时间为 11~12 s 减少了 9.1%~10%。

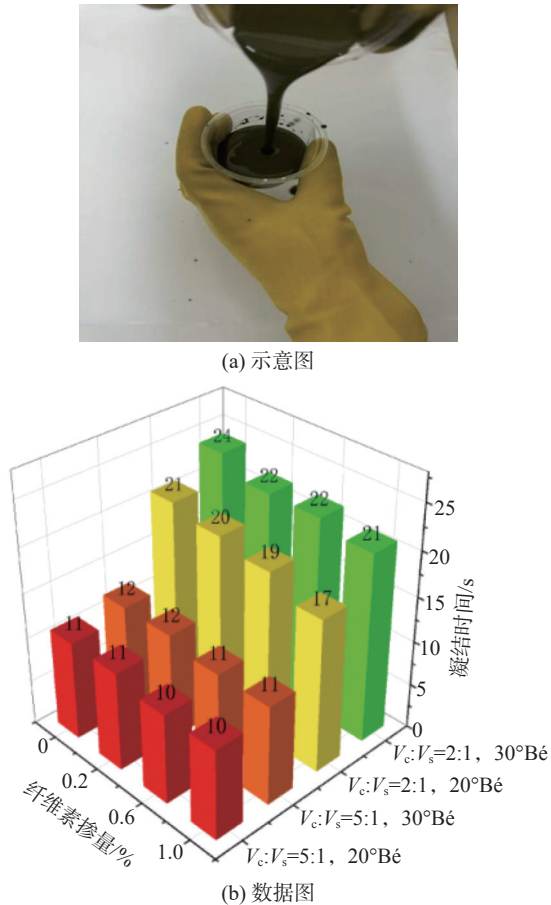


图 2 倒杯法测凝结时间示意及数据图
Fig. 2 Schematic diagram and data graph of setting time measured by the pouring cup method

随着水泥浆液与水玻璃浆液体积比 $V_c:V_s$ 增大, C-S 浆液的凝结时间减少,在水玻璃 20°Bé条件下, $V_c:V_s=5:1$ 浆液凝结时间比 $V_c:V_s=2:1$ 浆液凝结时间减少了 41.2%~47.6%;而在水玻璃 30°Bé条件下,凝结时间相对应减少了 47.6%~54.2%。

分析认为,体积比($V_c:V_s$)对凝结时间的影响最大,当波美度一致时,体积比增大意味着水泥在浆液中的比例提高,钙离子浓度随之增加,与水玻璃中的硅酸钠反应速率加快,从而缩短凝结时间;当体积比一致时,低波美度的水玻璃流动性更好,使得反应物更易接触,随着波美度的降低,反应速率提升,凝结时间随之缩短。对照组 C-S 浆液随着 PP 掺量的增大凝结时间降低,试验组 C-S 浆液随着 PP 掺量的增大凝结时间增大。

2.2 单轴抗压强度及弹性模量

抗压强度决定材料在受到压力作用时的抵抗破坏能力,反映材料在外力施压时的强度极限。弹性模量是指材料在弹性变形范围内,应力与应变的比值,反映材料抵抗弹性变形的能力,一定程度上反映材料的韧性。本文对标准养护条件下的试件进行 7 d 无侧限单轴抗压强度试验,试验照片见图 3,试验结果见图 4、图 5。

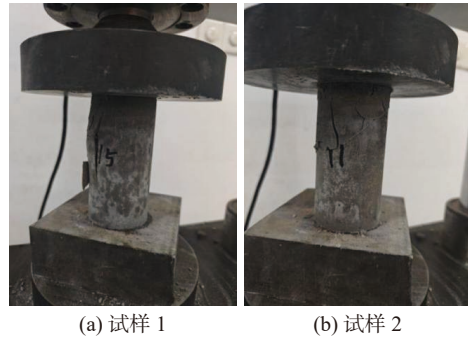


图 3 抗压强度试验示意图
Fig. 3 Schematic diagram of compressive strength experiment

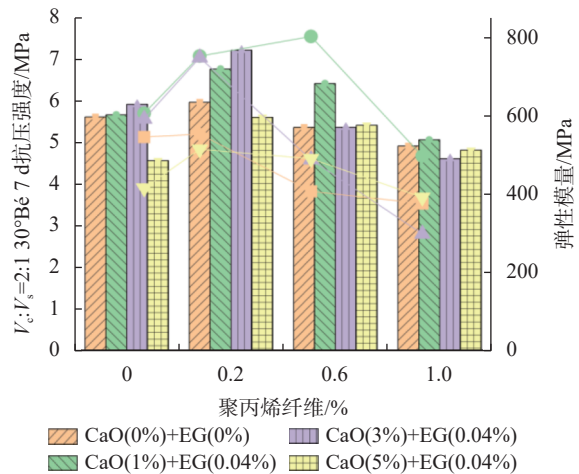


图 4 30°Bé抗压强度及弹性模量数据图
Fig. 4 Data graph of compressive strength and elastic modulus at 30°Bé

分析图 4 与图 5 可知,随着 PP 掺量的增大,试件的抗压强度呈现先提升后降低的趋势,且在 PP 掺量为 0.2% 时达到最大。掺量为 CaO(1%)+EG(0.04%)组的弹性模量均高于对照组,且随着 PP 掺量的增大,其弹性模量呈现先提升后降低的趋势,PP 掺量为 0.6% 时达到最高。

由图 4 可知,在 $V_c:V_s=2:1$ 、水玻璃 30°Bé条件下,掺量 CaO(1%)+EG(0.04%)组表现出最佳性能,在 PP 掺量 0%, 0.2%, 0.6%, 1% 时,抗压强度分别达到 5.65, 6.75, 6.40, 5.05 MPa, 比对照组的 5.60, 5.95,

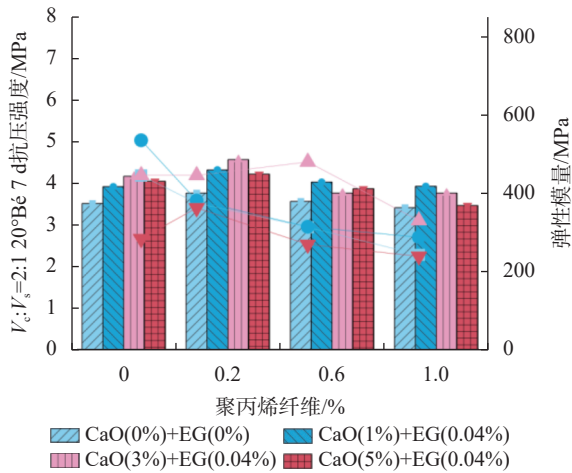


图5 20°C Bé抗压强度及弹性模量数据图

Fig. 5 Data graph of compressive strength and elastic modulus at 20°C

5.35, 4.90 MPa 分别提升 0.9%, 13.4%, 19.6%, 3.1%; 弹性模量分别达到 604.3, 750.0, 800.0, 495.1 MPa, 相比对照组的 543.7, 550.9, 450.3, 374.0 MPa, 分别提升了 11.1%, 36.1%, 77.7%, 132.4%。

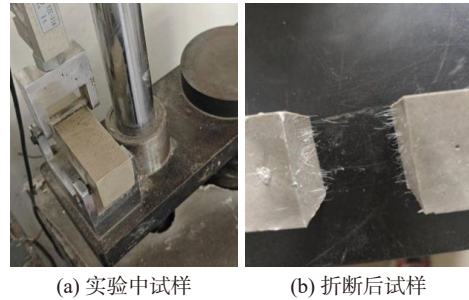
分析图 5 可知, 在 $V_c : V_s = 2 : 1$ 、水玻璃 20°C Bé 条件下, 试验组均高于对照组, CaO(1%)+EG (0.04%) 组强度达到 3.9 ~ 4.3 MPa, 相比对照组的 3.40 ~ 3.75 MPa 提升了 11.4% ~ 30%; 同时, 弹性模量分别达到 328.6 ~ 477.4 MPa, 比对照组的 237.8 ~ 360.6 MPa 提升 38.2% ~ 67%; CaO(3%)+EG(0.04%) 组抗压强度达到 3.75 ~ 4.55 MPa 比对照组提升 5.6% ~ 21.3%, CaO(5%)+EG(0.04%) 组抗压强度达到 3.45 ~ 4.20 MPa 比对照组提升 1.5% ~ 15.1%。

分析认为, 氧化钙促进水化反应和生成致密的硅酸盐结构, 并直接影响了体系中钙离子的浓度, EG 作为稳定剂, 影响其水化反应的效率和产物的结构。PP 通过增强结构和提供机械支撑并通过减少水和氧气的自由流动, 减缓水玻璃的膨胀, 三者共同作用, 提高了水泥水玻璃固结体的抗压强度和弹性模量。7 d 抗压强度随着 PP 的增加呈现先提高后降低的趋势, 掺量为 CaO(1%)+EG(0.04%) 的组抗压强度整体表现出最佳性能, 在 PP 掺量为 0.2% 时, 各试验组强度均达到峰值。当 PP 掺量超过 0.2% 时, PP 在浆液中易出现团聚现象, 难以分散均匀, 因此出现抗压强度降低的情况。7 d 弹性模量掺量为 CaO (1%)+EG (0.04%) 的组整体表现出最佳性能, 弹性模量呈现先增加后降低的趋势且数值在 PP 掺量为 0.6% 时达到最高。

2.3 折压比

折压比(F/C)是指在一定条件下, 材料在承受压

力时的容许应力和极限应力之比, 一定程度上反映着材料的韧性。试验照片见图 6, 试验结果如图 7 与图 8 所示。



(a) 实验中试样 (b) 折断后试样

图6 抗折试验示意图

Fig. 6 Schematic diagram of flexural test

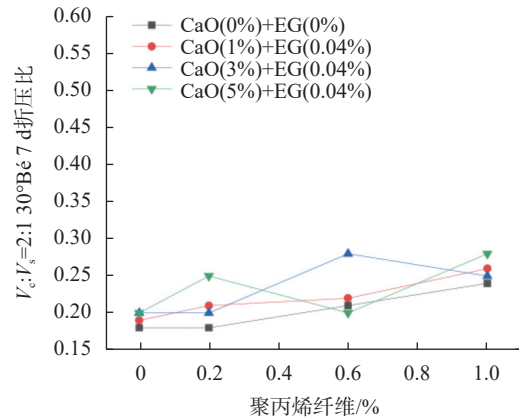


图7 体积比 2 : 1 30°C Bé 7 d 折压比

Fig. 7 Volume ratio 2 to 1, 30°C Bé, 7 d flexural-compression ratio

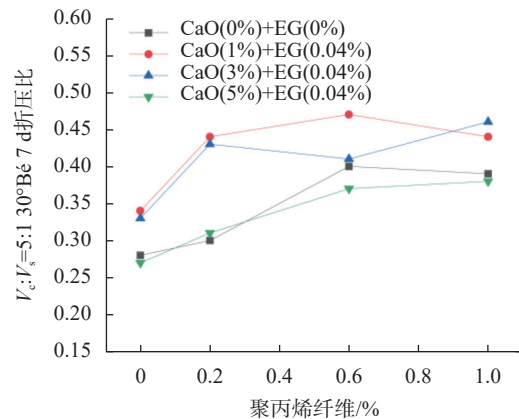


图8 体积比 5 : 1 30°C Bé 7 d 折压比

Fig. 8 Volume ratio 5 to 1, 30°C Bé, 7 d flexural-compression ratio

结合图 7 分析, 在 $V_c : V_s = 2 : 1$ 、水玻璃 30°C Bé 条件下, 随着 PP 掺量的增加, 掺量为 CaO(1%)+EG (0.04%) 的组折压比呈现持续上升的趋势, CaO (1%)+EG(0.04%) 组在 PP 掺量 0%, 0.2%, 0.6%, 1.0% 掺量下折压比分别为 0.19, 0.21, 0.22, 0.26, 比

对照组的 0.18, 0.18, 0.21, 0.24 提升了 5.6%, 6.7%, 4.7%, 8.3%; CaO(3%)+EG(0.04%)组折压比呈现先提高后降低的趋势, 折压比分别为 0.20, 0.20, 0.28, 0.25, 比对照组提升了 11.1%, 11.1%, 33.3%, 4.2%。

结合图 8 分析, 在 $V_c : V_s = 5 : 1$ 、水玻璃 30°Bé 条件下, 随着 PP 掺量的增加, 掺量 CaO(1%)+EG(0.04%)组折压比呈现先提高后降低的趋势, 其折压比达到 0.33 ~ 0.44, 比对照组的 0.28 ~ 0.40 提升 12.8% ~ 46.7%; 而 CaO(3%)+EG(0.04%)组折压比呈现先提高后降低再提高的趋势, 其折压比达到 0.33 ~ 0.46, 比对照组的提升 2.5% ~ 43.3%。

2.4 拉压比

拉压比(T/C)是抗拉强度与抗压强度的比值, 直接影响水泥固结体的承载力, 一定程度上反映材料的韧性。试验照片见图 9, 试验结果如图 10 所示。

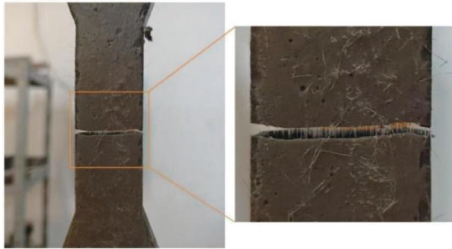


图 9 ECC 拉伸试验示意图

Fig. 9 Schematic diagram of ECC tensile test

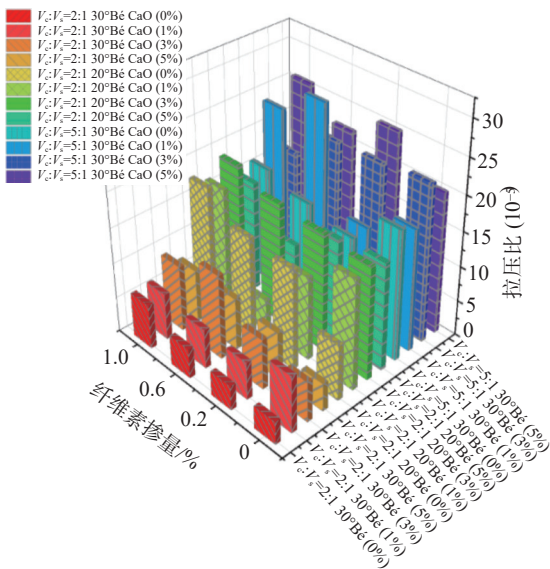


图 10 ECC 拉压比数据图

Fig. 10 Data graph of tension-compression ratio of ECC

结合图 10 分析, PP 在抗拉强度中起着重要作用。首先, 加入 PP 类似于加筋, 其高比表面积和约束作用能够增强材料的结构, 其次, 加入 PP 类似于加入“消泡剂”, PP 的桥连作用使试件内部形成更稳定的网络结构, 减少了因水和氧气自由流动而导致的

内部应力集中, 从而显著提升了试件的抗拉强度。此外, PP 的约束作用还能够限制水玻璃的膨胀和收缩, 进一步增强了材料的韧性, 使其在拉力作用下不易发生断裂。

$V_c : V_s = 2 : 1$ 、水玻璃 30°Bé 条件下, CaO(1%)+EG(0.04%)组拉压比呈现先降低后提高的趋势, 在纤维 0%, 0.2%, 0.6%, 1.0% 掺量下, 拉压比为 $5.32 \times 10^{-5} \sim 8.03 \times 10^{-5}$ 比对照组的 $3.21 \times 10^{-5} \sim 6.28 \times 10^{-5}$ 提升 5.1% ~ 150.2%; CaO(3%)+EG(0.04%)组拉压比呈现先提高后降低的趋势, 该组拉压比为 $5.65 \times 10^{-5} \sim 11.98 \times 10^{-5}$, 比对照组提升 49% ~ 186.6%; CaO(5%)+EG(0.04%)组拉压比呈现先提高后平稳的趋势。该组拉压比为 $3.94 \times 10^{-5} \sim 7.48 \times 10^{-5}$, 比对照组提升 19.1% ~ 92.5%。

$V_c : V_s = 2 : 1$ 、水玻璃 20°Bé 条件下, CaO(3%)+EG(0.04%)组拉压比呈现持续提高的趋势, 该组拉压比为 $16 \times 10^{-5} \sim 19.15 \times 10^{-5}$, 比对照组的 $7.84 \times 10^{-5} \sim 18.17 \times 10^{-5}$ 提升 5.4% ~ 104.1%。

$V_c : V_s = 5 : 1$ 、水玻璃 30°Bé 条件下, CaO(3%)+EG(0.04%)组拉压比呈现持续降低的趋势, 该组拉压比为 $16.84 \times 10^{-5} \sim 22.35 \times 10^{-5}$, 比对照组的 $13.59 \times 10^{-5} \sim 18.41 \times 10^{-5}$ 提升 2.3% ~ 59.7%。

综上所述, CaO(3%)+EG(0.04%)组合在不同体系中表现突出, 尤其在 20°Bé 水玻璃条件下实现拉压比 19.15×10^{-5} 的峰值, 较对照组提升 104.1%。

2.5 冲击性能

试验依据《纤维混凝土试验方法》(CECS 13: 2009), 冲击前后的试件如图 11 所示。性能指标采用式(1)、式(2)计算。



(a) 冲击前试样

(b) 冲击后试样

图 11 抗冲击试验示意图

Fig. 11 Schematic diagram of impact resistance experiment

$$W_1 = N_1 mgh \quad (1)$$

式中: W_1 为初裂冲击耗能, J; N_1 为试件初裂时的冲击次数; m 为冲击锤的质量, kg; g 为重力加速度, 取 9.81 m/s^2 ; h 为冲击锤下落高度, 500 mm。

$$W_2 = N_2 mgh \quad (2)$$

式中: W_2 为破坏冲击耗能, J; N_2 为试件破坏的冲击次数。

以 $V_c : V_s = 2 : 1$ 、水玻璃 30°Bé 为研究对象, 抗冲击性能如表 4 所示。总体来看, PP 掺量在 0.2% 和 1% 时, 试件完全开裂的冲击耗能较大, 抗压强度较高的试件初裂冲击耗能显著增加, 表明材料抗裂性与强度呈正相关关系, 完全开裂时需要的冲击耗能也更大, 如第 8 组试验, 其冲击耗能 W_1 和 W_2 均较该组大幅度降低, 相对应第 8 组在抗压强度测试中, 其抗压强度也出现比该组其他配比降低的情况, 这是由于高掺量纤维易纠缠成团, 难以分散均匀。容易出现局

部薄弱点, 阻碍水泥浆体的均匀性, 从而导致抗压、抗冲击强度降低。当 PP 掺量在 1% 时, 完全开裂与第一条可视裂缝间隔的冲击次数相差较大, 说明添加 PP 在试件中类似于“加筋”, 使得 PP 的桥接作用在抗冲击性能上得到发挥。CaO(1%)+EG(0.04%) 组出现第一条可视裂缝所需冲击次数普遍较高, 以第 6 组为例, 第一条可视裂缝需冲击 11 次, W_1 达到 107.91 J, 对照组 W_1 提升 450%, W_2 达到 147.15 J, 较对照组 W_2 提升 275%, 这也与该组抗压强度高有关系。因此, 抗压强度决定着第一条裂缝出现的冲击耗能, PP 掺量决定着完全开裂的冲击耗能。

表 4 抗冲击性能
Tab. 4 Impact resistance

编号	第一条可视裂缝		完全开裂		编号	第一条可视裂缝		完全开裂	
	次数	W_1 冲击耗能/J	次数	W_2 冲击耗能/J		次数	W_1 冲击耗能/J	次数	W_2 冲击耗能/J
1	2	19.62	4	39.24	9	1	9.81	2	19.62
2	2	19.62	5	49.05	10	4	39.24	7	68.67
3	3	29.43	4	39.24	11	1	9.81	2	19.62
4	6	58.86	11	107.91	12	4	39.24	7	68.67
5	9	88.29	10	98.10	13	3	29.43	4	39.24
6	11	107.91	15	147.15	14	1	9.81	3	29.43
7	9	8.29	14	137.34	15	2	19.62	4	39.24
8	3	29.43	5	49.05	16	2	19.62	10	98.10

3 机理分析

水泥的主要成分为硅酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)、硅酸二钙($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)、铝酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)、铁铝酸四钙($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), 主要用于提供灌浆材料的强度和耐久性。水玻璃的主要成分为硅酸钠($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$), 主要作为促凝剂, 加速水泥浆液的凝固。水泥-水玻璃浆液的反应主要生成硅酸钙凝胶, 结构单元主要为图 12 所示的硅氧四面体与钙离子。氧化钙的加入直接改变体系 Ca^{2+} 浓度, 当 Ca^{2+} 正电荷密度与硅氧四面体链负电荷密度趋于匹配, 且体系 Ca/Si 处于 0.8~1.2 的较优范围时, Ca^{2+} 浓度接近水玻璃中活性硅酸根的反应需求, 有利于 C-S-H 凝胶均匀生成, 体系稳定性与多项力学性能接近峰值。继续增加 CaO 后, 抗压强度受孔隙细化与针状钙矾石 (AFt) 生成的耦合作用趋于稳定, 而抗拉性能在 PP 纤维桥接、界面咬合及微裂缝约束作用下仍持续改善; 因此在 CaO 为 3% 时, Ca^{2+} 促进水泥中 C_3A 与硫酸盐反应, 针状钙矾石 (AFt) 增多, 并与 PP 纤维协同

形成“刚性骨架—柔性桥接”复合结构, 宏观上表现为 7 d 拉压比提高。EG 作为氢键的良好给体, 掺杂后能够在硅氧四面体链之间形成氢键 (见图 12), 从而稳定整体结构, 提高浆液性能。PP 对于硅酸钙凝胶的作用主要基于范德华力以及分子链条之间的拓扑缠绕, 合适的掺杂比例可以使硅氧四面体链之间结

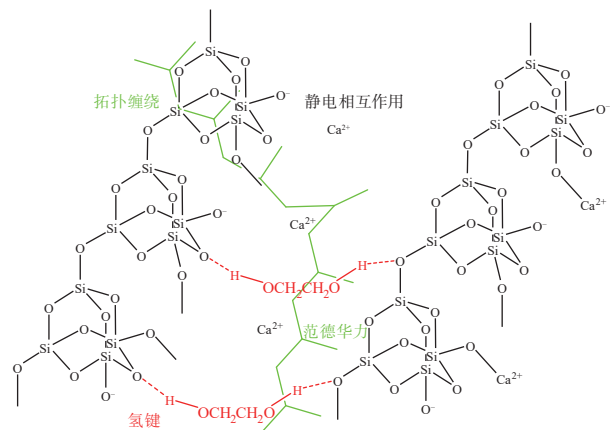


图 12 机理分析示意图

Fig. 12 Schematic diagram of mechanism analysis

合更为紧密,提高各项性能,而过多的掺杂可能会出现PP自身的缠绕,使硅氧四面体链之间结合疏松,最终导致性能的降低。

图12中黑色为硅酸钙凝胶组分,红色为乙二醇,与硅氧四面体链形成氢键(红色虚线),绿色为高分子纤维,与硅氧四面体链存在拓扑缠绕与范德华力。

4 结论

(1)体积比一致时,水玻璃20°Bé比30°Bé条件下凝结时间缩短9.1%~19%,这是由于低波美度的水玻璃流动性更好,使得反应物更易接触,反应速率提升;波美度一致时,体积比为5:1时比2:1条件下凝结时间缩短41.2%~54.2%,这是由于体积比增大意味着水泥在浆液中的比例提高,钙离子浓度随之增加,与水玻璃中的硅酸钠反应速率加快。

(2)掺量为CaO(1%)+EG(0.04%)的组7d抗压强度、弹性模量和折压比整体表现出最佳性能,抗压强度最高达到6.75 MPa,较对照组提升14.3%;弹性模量最高达到800 MPa,较对照组提升77.7%;折压比最高达到0.47,较对照组提升17.5%。这是由于氧化钙促进水化反应和生成致密的硅酸盐结构,并直接影响了体系中钙离子的浓度,EG作为稳定剂,影响其水化反应的效率和产物的结构,PP通过增强结构和提供机械支撑并通过减少水和氧气的自由流动,减缓水玻璃的膨胀,三者共同作用,提高了水泥水玻璃固结体的抗压强度、弹性模量和折压比。

(3)在7d拉压比方面,掺量为CaO(3%)+EG(0.04%)组在整体条件下表现出最佳性能且数据均高于对照组,最高达到 19.15×10^{-5} 的峰值,较对照组提升达104.1%。这是由于PP的桥连作用使试件内部形成更稳定的网络结构,减少了因水和氧气自由流动而导致的内部应力集中;对于冲击性能来说,抗压强度决定着第一条裂缝出现的冲击耗能,PP掺量决定着完全开裂的冲击耗能。

(4)养护周期方面,本研究仅对固结体进行了7d养护条件下的性能测试。然而,水泥基材料的水化反应是一个长期过程,随着养护时间的延长,水化产物的类型、含量及结构会持续发生变化,如C-S-H凝胶的进一步聚合,这些变化可能对固结体的长期力学性能和稳定性产生显著影响。环境因素方面,未考虑工程实际中温度、湿度的动态变化对固结体性能的影响。温度波动可能改变水化反应速率和产物稳定性,例如高温可能导致AFt分解;湿度变化则可能引发固结体干缩或湿胀,进而产生微裂纹,影响其力学性能和耐久性。

5 展望

(1)长期性能研究:开展不同养护龄期(如28, 90, 180 d)下CaO掺量对固结体力学性能、微观结构及耐久性(如抗渗性、抗侵蚀性)的影响研究,明确长期服役过程中材料性能的演化规律和失效机制。

(2)环境适应性研究:模拟工程中可能遇到的温度(-20~60℃)、湿度(如相对湿度30%~90%)变化条件,探究CaO掺量与环境因素的交互作用对固结体性能的影响,建立考虑环境因素的性能预测模型。

(3)多元体系研究:探索水泥-水玻璃-CaO三元体系与其他外加剂(如减水剂、缓凝剂、膨胀剂等)的兼容性,通过复合改性技术协同提升固结体的综合性能,拓展其在不同工程场景中的应用范围。

参考文献

- [1] 张庆松,张连震,刘人太,等.水泥-水玻璃浆液裂隙注浆扩散的室内试验研究[J].*岩土力学*, 2015, 36(8): 2159-2168. (ZHANG Q S, ZHANG L Z, LIU R T, et al. Laboratory experimental study of cement-silicate slurry diffusion law of crack grouting with dynamic water[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(8): 2159-2168. (in Chinese))
- [2] 李术才,孙子正,刘人太,等.基于裂隙动水注浆的水泥-水玻璃浆液相界面特征研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2013, 32(8): 1640-1646. (LI S C, SUN Z Z, LIU R T, et al. Research on phase interface characteristics of cement-silicate grout based on crack grouting with dynamic water[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(8): 1640-1646. (in Chinese))
- [3] 杨秀竹,雷金山,张屿庆,等.岩溶水养护条件下改性水泥-水玻璃浆液性能试验研究[J].*铁道科学与工程学报*, 2019, 16(12): 2999-3004. (YANG X Z, LEI J S, ZHANG Y Q, et al. Study of the orthogonal test of modified cement-water glass grouting material under the curing condition of Karst water[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2019, 16(12): 2999-3004. (in Chinese))
- [4] 夏冲,李传贵,冯啸,等.水泥粉煤灰-改性水玻璃注浆材料试验研究与应用[J].*山东大学学报(工学版)*, 2022, 52(1): 66-73,84. (XIA C, LI C G, FENG X, et al. Experiment study and application of cement fly ash-modified sodium silicate grouting material test[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2022, 52(1): 66-73,84. (in Chinese))
- [5] 纪荣健,杨建明,吴庆,等.水玻璃对大流动度的磷酸铵镁水泥浆体性能的影响[J].*硅酸盐通报*, 2020, 39(1): 28-33. (JI R J, YANG J M, WU Q, et al. Effect of

- water glass on properties of high flowing magnesium ammonium phosphate cement paste[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(1): 28-33. (in Chinese))
- [6] 宗明明, 李 涛, 杨建明, 等. 硫酸盐环境下水玻璃对磷酸钾镁水泥浆体力学的影响 [J]. *中国测试*, 2023, 49(3): 152-158. (ZONG M M, LI T, LI J M, et al. Effect of sodium silicate in sulfate environment on the mechanics of potassium magnesium phosphate cement slurry[J]. *China Measurement & Test*, 2023, 49(3): 152-158. (in Chinese))
- [7] 陈 鹏, 王先明, 周安琦, 等. 盾构隧道水泥-水玻璃双液同步注浆研究及应用 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21(12): 5163-5174. (CHEN P, WANG X M, ZHOU A Q, et al. Research and application of cement-sodium silicate two-component synchronous grouting material in shield tunnel[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21(12): 5163-5174. (in Chinese))
- [8] 郑 昊, 李兆平, 王子元, 等. 超细水泥-水玻璃双液浆性能及注浆止水效果试验研究 [J]. *铁道建筑*, 2024, 64(1): 95-99. (ZHENG H, LI Z P, WANG Z Y, et al. Experimental study on performance and grouting water plugging effect of ultrafine cement-sodium silicate slurry[J]. *Railway Engineering*, 2024, 64(1): 95-99. (in Chinese))
- [9] 汤青青, 张丽娟, 孙国文, 等. 三乙醇胺-氢氧化钙对大掺量粉煤灰水泥胶凝体系早期活性激发 [J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(9): 2737-2742. (TANG Q Q, ZHANG L J, SUN G W, et al. Early activity of triethanolamine-calcium hydroxide activates to high volume fly ash in cement-gel system[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(9): 2737-2742. (in Chinese))
- [10] 李祖仲, 毛浩天, 王 亮, 等. 混凝土早强修补材料基准水泥配合比优化研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2025, 44(3): 802-810. (LI Z Z, MAO H T, WANG L, et al. Optimization of standard cement mix ratio for concrete early-strength repair materials[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2025, 44(3): 802-810. (in Chinese))
- [11] 张 轶, 张 彪, 邓翔文, 等. LDHs-NO₂ 对水泥砂浆性能及钢筋锈蚀的影响 [J]. *硅酸盐通报*, 2025, 44(1): 1-10. (ZHANG Y, ZHANG B, DENG X W, et al. Effect of LDHs-NO₂ on properties of cement mortar and corrosion of steel bar[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2025, 44(1): 1-10. (in Chinese))
- [12] 王晨宇, 韦经杰, 龙武剑, 等. 纤维取向分布对水泥基复合材料力学性能的影响及其评价方法的研究进展 [J]. *材料导报*, 2022, 36(15): 20120133. (WANG C Y, WEI J J, LONG W J, et al. Review on the effect of fiber orientation distribution on mechanical performance of cement-based composites and its evaluated methods[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(15): 20120133. (in Chinese))
- [13] LIU P, WANG H T, LIU Q S, et al. FDEM numerical study on the large deformation mechanism of layered rock mass tunnel under excavation-unloading disturbance[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2025, 159: 106497.
- [14] 曾熙文, 王艳芬, 赵光明, 等. 聚丙烯纤维改性超细水泥复合注浆材料性能研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(7): 57-67. (ZENG X W, WANG Y F, ZHAO G M, et al. Study on properties of polypropylene fiber-modified ultrafine cement composite grouting materials[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(7): 57-67. (in Chinese))
- [15] 马豪达, 白 银, 陈 波, 等. 水胶比和橡胶掺量对砂浆力学性能及能量演化规律的影响 [J]. *材料导报*, 2025, 39(1): 23120226. (MA H D, BAI Y, CHEN B, et al. Influence of water-cement ratio and rubber admixture on mechanical properties and energy evolution law of mortar[J]. *Materials Reports*, 2025, 39(1): 23120226. (in Chinese))
- [16] 贾 毅, 赵 强, 韦朝宽, 等. 聚丙烯纤维增强水泥基复合材料单轴拉伸损伤本构模型研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43(11): 4061-4071. (JIA Y, ZHAO Q, WEI C K, et al. Uniaxial tensile damage constitutive model of polypropylene fiber reinforced engineered cementitious composites[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2024, 43(11): 4061-4071. (in Chinese))
- [17] 沈 霁, 姚力豪, 王彦平, 等. PP 纤维对疏水性水泥-矿渣复合材料性能的影响 [J]. *化工新型材料*, 2024, 52(S1): 266-271. (SHEN J, YAO L H, WANG Y P, et al. Effect of PP fibers on the performance of hydrophobic cement-slag composites[J]. *New Chemical Materials*, 2024, 52(S1): 266-271. (in Chinese))
- [18] 范 淋, 杨 翌, 祁小龙, 等. SMAF 增强 PP/PVA 混杂纤维工程水泥基复合材料拉伸性能 [J]. *硅酸盐通报*, 2025, 44(3): 811-820. (FAN L, YANG Z, QI X L, et al. Tensile properties of pp/pva hybrid fiber engineered cementitious composites reinforced by SMAF[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2025, 44(3): 811-820. (in Chinese))
- [19] 李召峰, 高益凡, 张 健, 等. 水溶性植物胶改性水泥-水玻璃封堵材料试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(7): 1312-1321. (LI Z F, GAO Y F, ZHANG J, et al. Experimental study of water-soluble vegetable gum-modified cement-sodium silicate plugging materials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020,

- 42(7): 1312-1321. (in Chinese))
- [20] 连会青, 杨俊文, 雷玉娟. 水泥-粉煤灰-水玻璃注浆材料强度影响因素试验研究 [J]. *煤炭工程*, 2018, 50(12): 107-112. (LIAN H Q, YANG J W, LEI Y J. Experimental study on the influence factors of strength of cement-fly ash-water-glass grouting material[J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(12): 107-112. (in Chinese))
- [21] 中华人民共和国交通部. 水泥混凝土圆柱体轴心抗压强度试验方法: T 0554—2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005. ((Ministry of Communications of the People's Republic of China. Test Method for Axial Compressive Strength of Cement Concrete Cylinders: T 0554—2005[S]. Beijing: China Communications Press, 2005.(in Chinese))
- [22] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法): GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. (State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Test method of cement mortar strength (ISO method): GB/T 17671—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese))
- [23] 工业和信息化部. 高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法: JC/T 2461—2018[S]. 北京: 建材工业出版社, 2018. (Ministry of Industry and Information Technology. Standard test method for the mechanical properties of ductile fiber reinforced cementitious composites: JC/T 2461—2018[S]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2018. (in Chinese))
- [24] 中国工程建设标准化协会. 纤维混凝土试验方法标准: CECS 13—2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010. (China Association for Engineering Construction Standardization. Standard test methods for fiber reinforced concrete: CECS 13—2009[S]. Beijing: China Planning Press, 2010. (in Chinese))
- [25] 陈 鑫, 殷苏鑫. 氧化钙-碳酸钠复合激发矿渣灌浆材料流变特性研究 [J]. *现代隧道技术*, 2023, 60(6): 269-277. (CHEN X, YIN S X. Study on the rheological properties of calcium oxide-sodium carbonate composite activated slag based grouting material[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2023, 60(6): 269-277. (in Chinese))
- [26] 田 婷, 张 爱, 李国新, 等. 氧化钙对硅酸盐水泥-铝酸盐水泥-硫酸钙体系低温水化性能的影响 [J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34(12): 3670-3675. (TIAN T, ZHANG A, LI G X, et al. Influence of calcium oxide on the hydration performance of Portland cement-aluminate cement-gypsum ternary system at low temperature[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 34(12): 3670-3675. (in Chinese))
- [27] 孔爱散, 钱懿嘉, 王 伟, 等. 聚丙烯纤维协同碳化养护技术改性水泥土的抗剪特性研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2025, 44(5): 1939-1948. (KONG A S, QIAN S J, WANG W, et al. Shear strength characteristics of cement soil modified with polypropylene fiber and carbonation curing technology[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2025, 44(5): 1939-1948. (in Chinese))
- [28] 鞠 鹏, 雷宝锋, 姬语洋, 等. 聚丙烯纤维对流态固化土流变及力学性能的影响 [J]. *材料导报*, 2025, 39(20): 94-101. (JU P, LEI B F, JI Y Y, et al. Effect of polypropylene fibers on rheological and mechanical properties of fluid-consolidated soil[J]. *Materials Reports*, 2025, 39(20): 94-101. (in Chinese))

收稿日期: 2025-05-05